

## Attachment B

## **Hochfrequenz-MEMS-Schalter mit gebogenem Schaltelement und Verfahren zu seiner Herstellung**

- 5 Die vorliegende Erfindung betrifft einen Hochfrequenz-MEMS-Schalter mit gebogenem Schaltelement gemäß dem Oberbegriff von Patentanspruch 1 und ein Verfahren zur Herstellung eines Hochfrequenz-MEMS-Schalters mit gebogenem Schaltelement gemäß dem Oberbegriff von Patentanspruch 11.
- 10 MEMS-Schalter bzw. Schaltelemente in MEMS-Technologie (MEMS = Micro Electro Mechanical Systems) kommen in den verschiedensten Bereichen zur Anwendung, wie beispielsweise Automobilelektronik, Telekommunikation, Medizintechnik oder Messtechnik. Aufgrund ihrer Miniaturisierung sind derartige, als mikroelektromechanisches System ausgestaltete Schaltelemente besonders auch für
- 15 Raumfahrtanwendungen und Satellitensysteme geeignet. Insbesondere auch in Radarsystemen, Satellitenkommunikationssystemen, drahtlosen Kommunikationssystemen und Instrumentensystemen kommen Hochfrequenz-MEMS-Schalter zum Einsatz. Beispielsweise auch in Phasenantennenanlagen und bei Phasenschiebern für satellitenbasierte Radarsysteme, werden Hochfrequenz-MEMS-
- 20 Schalter benötigt.

Hochfrequenz-MEMS-Schalter bieten eine Reihe von Vorteilen, wie z.B. einen äußerst geringen Stromverbrauch, eine gute Isolation bzw. geringe Störkapazitäten, eine geringe Einfügedämpfung bzw. geringe Einfügedverluste und geringe

25 Herstellungskosten.

In dem Artikel „RF-MEMS-Switches, Switch Circuits, and Phase Shifters, von Gabriel M. Rebeiz et al. in Revue HF No. 2/2001 werden MEMS-Schalter beschrieben, die im Hochfrequenzbereich eingesetzt werden, in einem Bereich zwischen 0,1

30 und 100 GHz. Diese MEMS-Schalter haben als mechanische Federn ausgestaltete freitragende Schaltarme, die durch elektrostatische Krafteinwirkung zum Öffnen

oder Schließen eines Schaltkreises betätigt werden. Der freitragende Schaltarm bzw. Cantilever-Balken ist auf einem Substrat befestigt und wird durch eine Elektrode elektrostatisch angezogen, um einen Kontakt zu schließen. Ohne anliegende Spannung geht der Schaltarm durch elastische Rückstellkräfte in seine Ausgangsposition zurück, und der Kontakt wird geöffnet.

Bei MEMS-Schaltern kann der Schaltvorgang auf verschiedene Arten bewirkt werden, die prinzipiell in den Figuren 3a – f als Beispiele gezeigt sind. Dabei beeinflusst ein Schaltelement das Fortschreiten einer elektromagnetischen Welle auf einer Signalleitung durch Öffnen oder Schließen eines Übertragungspfades. Dies kann in der Art eines Serienschalters, eines Shunt-Schalters oder eines Serien-Shunt-Schalters erfolgen. Allgemein ist im geöffneten Zustand des Schaltelements ein großer Abstand zum Kontaktbereich notwendig, da die Kapazität in diesem Zustand möglichst gering sein soll, um eine ungestörte Leitung zu erhalten. Für den Schaltvorgang selbst ist jedoch ein geringer Abstand erforderlich, da nur geringe elektrostatische Kräfte wirken.

In dem Artikel von C. Chang und P. Chang, „Innovative Micromachined Microwave Switch with very Low Insertion Loss“, Proceedings of the 10th International Conference on Solid-State Sensors Actuators (Transducers 99), June 7 – 10, 1999, Sendai, Japan, S. 1830 – 33, ist ein MEMS-Schalter mit einem gebogenen Schaltelement beschrieben, das in Form eines Cantilever-Balkens als freitragendes Element ausgestaltet ist. Das Schaltelement ist oberhalb einer Bodenelektrode mit einem Ende auf einem Substrat befestigt, wobei der übrige Bereich des Schaltelements bogenförmig nach oben gerichtet ist und vom Substrat wegragt. Beim Anlegen einer Schaltspannung legt sich das nach oben gebogene Schaltelement durch elektrostatische Kräfte an die Bodenelektrode an, so dass das freie Ende des Schaltelements mit einer Signalleitung in Kontakt gerät. Ohne die anliegende Schaltspannung wird das Schaltelement durch eine elastische Zugspannung zurück in die nach oben gerichtete Position gebracht, in der es von der Signalleitung

weit entfernt ist. Beim Hin- und Herschalten zwischen den beiden Schaltzuständen bewegt sich das Schaltelement wie die Zunge eines Frosches.

- Allgemein besteht bei den MEMS-Schaltern das Problem, dass die elastischen
- 5 Rückstellkräfte in der Regel sehr klein sind, so dass die Gefahr besteht, dass das Schaltelement durch Adhäsion an der Oberfläche der Signalleitung anhaftet. Dadurch mangelt es den Schaltelementen oftmals an einer ausreichenden Zuverlässigkeit, die für Langzeiteinsätze beispielsweise im Weltraum notwendig ist.
- 10 Deshalb wurde versucht, das Schaltelement stärker auszugestalten, um dadurch stärkere Rückstellkräfte zu erreichen. Jedoch reichen dabei die elektrostatischen Kräfte in den meisten Fällen nicht aus, um zuverlässig die Schaltvorgänge zu bewirken.
- 15 Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, einen Hochfrequenz-MEMS-Schalter mit gebogenem Schaltelement zu schaffen, der bei geringen Störkapazitäten eine hohe Langzeitzuverlässigkeit gewährleistet, wobei bei geringem Platzbedarf eine höhere mechanische Stabilität und eine größere Schaltkraft erreicht wird.
- 20 Diese Aufgabe wird gelöst durch den Hochfrequenz-MEMS-Schalter mit gebogenem Schaltelement gemäß Patentanspruch 1 und durch das Verfahren zur Herstellung eines Hochfrequenz-MEMS-Schalters mit gebogenem Schaltelement gemäß Patentanspruch 11. Weitere vorteilhafte Merkmale, Aspekte und Details der
- 25 Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen, der Beschreibung und den Zeichnungen.

Der Hochfrequenz-MEMS-Schalter gemäß der vorliegenden Erfindung umfasst einen Signalleiter, der auf einem Substrat angeordnet ist, ein länglich geformtes

30 Schaltelement, das einen gebogenen elastischen Biegebereich aufweist und freitragend auf dem Substrat befestigt ist, und eine Elektrodenanordnung zur Erzeu-

5 gung einer auf das Schaltelement wirkenden elektrostatischen Kraft, um das Schaltelement zum Signalleiter hin zu biegen, wobei das Schaltelement in seiner Längsrichtung parallel zum Signalleiter angeordnet ist und einen Kontaktbereich aufweist, der sich quer zum Schaltelement teilweise oder vollständig über den Signalleiter erstreckt, und wobei sich der elastische Biegebereich des Schaltelements bei Einwirkung der elektrostatischen Kraft parallel zur Signalleitung fortschreitend an die Elektrodenanordnung annähert.

10 Bei dem erfindungsgemäßen Hochfrequenz-MEMS-Schalter wird die erforderliche Spannung zum Schließen des Elements gering gehalten, wobei dennoch ein großer Schaltweg möglich ist, so dass der Abstand im offenen Zustand groß ist und dadurch die Kapazität gering ist. Durch die Anordnung des Schaltelements in seiner Längsrichtung parallel zum Signalleiter wird auch eine weitere Miniatürisierung erreicht, wobei das Schaltelement dennoch relativ lang ausgestaltet werden kann und dadurch eine höhere mechanische Stabilität und eine größere Schaltkraft erreicht wird. Insbesondere ist auch eine größere Rückstellkraft bzw. stärkere Ausgestaltung des Schaltelements möglich. Aufgrund der großen möglichen Länge und Fläche des Schaltelements können größere elektrostatische Kräfte einerseits und größere Rückstellkräfte bzw. eine dickere Ausgestaltung des Schaltelements andererseits erzielt werden.

25 Bevorzugt umfasst das Schaltelement mindestens zwei Schaltarme mit gebogenem elastischem Biegebereich, die beidseitig des Signalleiters angeordnet sind und sich in ihrer Längsrichtung parallel zum Signalleiter erstrecken, wobei die Schaltarme durch eine über dem Signalleiter positionierte Brücke miteinander verbunden sind, die durch den jeweiligen Kontaktbereich gebildet wird. Durch die beidseitige Anordnung mit brückenartigem Kontaktbereich wird die Zuverlässigkeit des MEMS-Schalters noch weiter erhöht, da noch größere Rückstellkräfte und elektrostatische Kräfte bei geringem Platz- und Energiebedarf erzielt werden können und dadurch bei geringem Platz- und Energiebedarf eine besonders hohe mechanische Stabilität und Schaltkraft erzielt wird.

Vorteilhafterweise wird die Elektrodenanordnung durch mindestens eine Boden- oder Basiselektrode gebildet, die unter dem Schaltelement flächig auf dem Substrat angeordnet ist, um das Schaltelement elektrostatisch anzuziehen. Die Basis-  
5 elektrode oder Bodenelektrode ist im Fall von beidseitig angeordneten Schaltarmen unterhalb jedes Schaltarmes angeordnet.

Gemäß einer anderen bevorzugten Ausführungsform wird die Elektrodenanordnung durch eine unterhalb des Substrats angeordnete Masseelektrode bzw. durch  
10 das Substrat selbst gebildet. Dadurch ergibt sich eine vereinfachte Herstellung und damit verringerte Herstellungskosten. Dabei kann das Substrat aus hochohmigem Silizium gefertigt sein.

Die Elektrodenanordnung erstreckt sich vorteilhafterweise parallel zur Substratoberfläche, um das Schaltelement durch die elektrostatische Kraft in seinem Biegebereich fortschreitend zur Substratoberfläche hinzuziehen. Der gebogene Biegebereich wird bevorzugt durch bimorphes Material gebildet.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung sieht vor, dass der Biegebereich zur Erzeugung einer Zugspannung eine z.B. durch Laserheating angeschmolzene Oberfläche aufweist. Dies hat den Vorteil, dass die Zugspannung durch entsprechende  
20 Auswahl der Dauer und Intensität der Laserbestrahlung entsprechend den jeweiligen Anforderungen eingestellt werden kann. Die Zugspannung kann auch durch geeignete Steuerung der Schichtabscheidung bei der Herstellung erreicht werden.  
25

Vorteilhafterweise ist das Schaltelement in Dünnschichttechnologie gefertigt. Dadurch wird eine kostengünstige Herstellung und kleine Bauweise erreicht.

30 Bevorzugt gerät der Kontaktbereich des Schaltelements bei Einwirken der elektrostatischen Kraft in direkten Kontakt mit dem Signalleiter. Alternativ dazu nimmt der

Kontaktbereich bei Einwirken der elektrostatischen Kraft einen minimalen Abstand zum Signalleiter ein, d.h. er tritt nicht in direkten Kontakt mit dem Signalleiter. Dadurch ergibt sich eine große Kapazität zwischen dem Signalleiter und dem Schaltelement, so dass die Signalleitung unterbrochen ist. Der minimale Abstand kann  
5 z.B. durch eine geeignete dielektrische Isolation erzielt bzw. aufrechterhalten werden.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Herstellung eines Hochfrequenz-MEMS-Schalters mit gebogenem Schaltelement werden nachfolgende Schritte  
10 durchgeführt: Ausbilden einer Signalleitung auf einem Substrat; gegebenenfalls Ausbilden einer Elektrodenanordnung an dem Substrat, beispielsweise wenn das Substrat keine Eigenleitung aufweist; Formung eines länglichen Schaltelements mit einem gebogenen elastischen Biegebereich auf dem Substrat derart, dass es in seinem Biegebereich von der Elektrodenanordnung durch eine elektrostatische  
15 Kraft der Länge nach zum Substrat hin gezogen wird und sich durch elastische Rückstellkraft im Biegebereich vom Substrat entfernt; wobei das Schaltelement in seiner Längsrichtung parallel zum Signalleiter derart angeordnet wird, dass sich ein seitlich hervorstehender Kontaktbereich des Schaltelements quer über den Signalleiter erstreckt, so dass sich der elastische Biegebereich des Schaltelements bei Einwirkung der elektrostatischen Kraft parallel zur Signalleitung fort-  
20 schreitend an die Elektrodenanordnung annähert, um den Kontaktbereich dem Signalleiter anzunähern. Die Elektrodenanordnung kann auch durch ein eigenleitendes Substrat oder einen eigenleitenden Substratbereich gebildet werden.

25 Durch das Verfahren wird auf kostengünstige Weise ein besonders zuverlässiger Hochfrequenz-MEMS-Schalter mit gebogenem Schaltelement hergestellt, der eine erhöhte mechanische Stabilität und erhöhte Schaltkräfte aufweist.

Vorteilhafterweise wird das Schaltelement so geformt, dass es mindestens zwei  
30 Schaltarme mit gebogenem elastischen Biegebereich aufweist, wobei die Schaltarme beidseitig des Signalleiters angeordnet werden, so dass sie sich in ihrer

Längsrichtung parallel zum Signalleiter erstrecken und die Schaltarme durch eine über dem Signalleiter positionierte Brücke miteinander verbunden sind, die durch den jeweiligen Kontaktbereich gebildet wird.

- 5 Bevorzugt ist als Elektrodenanordnung mindestens eine Basiselektrode unter dem Schaltelement flächig auf dem Substrat angeordnet. Als Elektrodenanordnung kann auch mindestens eine unterhalb des Substrat angeordnete Masseelektrode gebildet werden. Vorteilhaft wird der Biegebereich durch bimorphes Material gebildet. Besonders vorteilhaft ist es jedoch, wenn die Oberfläche des Biegebereichs zur Erzeugung einer Zugspannung mittels Laserheating angeschmolzen wird. Ins-  
10 besondere kann das Verfahren zur Herstellung des erfindungsgemäß ausgestalteten Hochfrequenz-MEMS-Schalters, wie er oben allgemein beschrieben ist, dienen.

- 15 Nachfolgend wird die Erfindung anhand der Figuren beschrieben, in denen

**Fig. 1** als perspektivische Darstellung einen Hochfrequenz-MEMS-Schalters gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung schematisch zeigt;

20

**Fig. 2** eine Draufsicht auf eine Anordnung von MEMS-Schaltern gemäß weiterer bevorzugter Ausführungsformen schematisch zeigt; und

25

**Fig. 3a – f** verschiedene Schalter-Konfigurationen von MEMS-Schaltern schematisch darstellen.

- Figur 1 zeigt als besonders bevorzugtes Ausführungsbeispiel einen MEMS-Schalter 10, der für Hochfrequenz-Anwendungen geeignet ist und zwei parallele Schaltarme aufweist. Der MEMS-Schalter 10 umfasst ein Substrat 11, auf dem eine Signalleitung 12 ausgebildet ist, die sich in einer Richtung über das Substrat  
30 erstreckt. Auf dem Substrat 11 ist ein nach oben gebogenes Schaltelement 13



befestigt, das in diesem Beispiel zwei länglich ausgestaltete, parallel zueinander verlaufende Schaltarme 13a, 13b umfasst. Die Schaltarme 13a, 13b des Schaltelements 13 sind jeweils mit einem Ende flächig auf der Substratoberfläche und parallel dazu befestigt, während ihr übriger Teil nach oben gebogen ist, so dass das jeweils andere Ende der Schaltarme 13a, 13b von der Substratoberfläche entfernt ist. Zu diesem Zweck weist jeder Schaltarm 13a, 13b des Schaltelements 13 einen zentralen elastischen Biegebereich 131, 132 auf, der in der hier gezeigten Schalterstellung nach oben gebogen bzw. gekrümmt ist.

- 10 Auf der Substratoberfläche ist unterhalb jedes Schaltarms 13a, 13b des Schaltelements 13 eine Elektrodenanordnung vorgesehen, die in diesem Beispiel durch zwei Bodenelektroden 14a, 14b gebildet wird. Die Bodenelektroden 14a, 14b dienen dazu, auf die freitragend befestigten Schaltarme 13a, 13b bei Vorliegen einer Schaltspannung eine elektrostatische Anziehungskraft auszuüben, so dass sie sich zur Substratoberfläche hin bewegen, wobei die elastischen Biegebereiche 131, 132 eine gerade Gestalt annehmen.

Das Schaltelement 13 umfasst weiterhin einen Kontaktbereich 15, der sich in diesem Beispiel quer über die Signalleitung 12 erstreckt. Wenn durch die Elektrodenanordnung 14a, 14b eine elektrostatische Kraft auf die Biegebereiche 131, 132 und die freien Enden der Schaltarme 13a, 13b ausgeübt wird, nähert sich der Kontaktbereich 15 an die Signalleitung 12 an, um einen direkten elektrischen Kontakt oder eine kapazitive Ankopplung an die Signalleitung 15 zu bewirken. In diesem Fall befindet sich der MEMS-Schalter 10 in seinem geschlossenen Zustand.

- 25 Das Schaltelement 13 ist in seinen Biegebereichen 131, 132 mit einer Zugspannung versehen, die eine Rückstellkraft bewirkt, so dass die Schaltarme 13a, 13b zurück in den gebogenen Zustand gelangen, wenn keine elektrostatische Anziehungskraft durch die Bodenelektroden 14a, 14b auf die Schaltarme 13a, 13b ausgeübt wird. In diesem Fall nimmt der MEMS-Schalter 10 seinen offenen Zustand ein, bei dem der Kontaktbereich 15 von der Signalleitung 12 entfernt ist und somit

kein elektrischer Kontakt und keine oder nur eine sehr geringe kapazitive Kopplung an die Signalleitung 12 vorliegt.

Das Schaltelement 13 ist mit seinen als längliche Balken ausgestalteten, freitragenden Schaltarmen 13a, 13b in seiner Längsrichtung parallel zur Signalleitung 12 angeordnet. Dabei bildet der Kontaktbereich 15 eine Brücke, die die beiden Schaltarme 13a, 13b im Bereich ihrer freien Enden miteinander verbindet und sich in diesem Ausführungsbeispiel vollständig über die Signalleitung 12 hinweg quer zu dieser erstreckt. Bei Einwirkung der elektrostatischen Kraft durch die Boden-

elektroden 14a, 14b auf die Schaltarme 13a, 13b nähern sich die Schaltarme 13a, 13b schrittweise bzw. fortlaufend von ihren befestigten Enden her an die Boden-

elektroden 14a, 14b an, in einer Richtung, die parallel zur Signalleitung 12 verläuft.

Figur 2 zeigt in einer Draufsicht von oben eine Anordnung von MEMS-Schaltern 20, bei denen die einzelnen Schaltelemente 23 jeweils nur einen länglichen, freitragenden Schaltarm 23a aufweisen, der parallel zur Signalleitung 22 verläuft. Jedes der Schaltelemente 23 hat ein oder mehrere seitlich am jeweiligen Schaltarm 23a angeordneten Kontaktbereich 25, der sich quer über die Signalleitung 22 erstreckt. Dabei kann sich der jeweilige Kontaktbereich 25 entweder vollständig quer über die gesamte Breite der Signalleitung 22 erstrecken oder auch nur teilweise.

Es können an einem Schaltelement 23 auch mehrere Kontaktbereiche 25 seitlich angeordnet sein, wie auf der rechten Seite in Figur 2 gezeigt.

Die Schaltelemente 25, die in Figur 2 im mittleren Bereich auf beiden Seiten der Signalleitung 22 angeordnet sind, sind so ausgerichtet, dass ihre gegenüberliegenden Kontaktbereiche 25 oberhalb der Signalleitung 22 zahnartig ineinander greifen.

Der in Figur 1 gezeigte Hochfrequenz-MEMS-Schalter 10 ist in einer Shunt-Konfiguration ausgeführt. In der nach oben gerichteten Position der als Cantilever-Elemente bzw. freitragend angeordneten Schaltarme 13a, 13b ist die Kopplungs-

kapazität aufgrund des Abstandes zwischen der Signalleitung 12 und dem Kontaktbereich 15 sehr gering. Daher ist der Einfluss auf das Fortschreiten einer elektromagnetischen Welle auf der Signalleitung 12 ebenfalls gering. Wenn eine Anregungsspannung oder Schaltspannung an der Struktur anliegt, wird das gekrümmte Schaltelement 13 dazu veranlasst, sich nach unten zu biegen, so dass der brückenartige Kontaktbereich 25 an die Signalleitung 12 oder in deren unmittelbarer Nähe gelangt, so dass eine hohe Kapazität zwischen der Signalleitung 12 und dem Schaltelement 13 entsteht, wodurch das Fortschreiten der elektromagnetischen Welle auf der Übertragungs- oder Signalleitung 12 behindert bzw. unterbrochen wird.

Die gezeigten Schaltelemente 13, 23 mit ihren Schaltarmen 13a, 13b, 23a und Kontaktbereichen 15, 25 sind in Dünnschichttechnologie gefertigt, wobei die gebogenen Schaltelemente mit ihren Schaltarmen parallel zur Signalleitung 12, 25 angeordnet sind und in der in Figur 1 gezeigten Ausführungsform durch eine Brücke, die durch den Kontaktbereich 15 gebildet wird, verbunden sind. Die Signalleitung 12, 22, die unterhalb der Brücke bzw. dem Kontaktbereich 15, 25 auf dem Substrat 11, 21 verläuft, hat typischerweise einen elektrischen Widerstand von beispielsweise ca. 50  $\Omega$ . Sie kann aber auch mit anderen Widerständen ausgestaltet sein, je nach den Erfordernissen der jeweiligen Anwendung. Der MEMS-Schalter bildet ein HF-Relais.

Die Figuren 3a – f zeigen als Beispiele verschiedenartige Schalterkonfigurationen, die mit dem erfindungsgemäßen MEMS-Schalter möglich sind. Figur 3a und 3b zeigen eine Schaltung in Serie mit der Signalleitung 12, wobei in Figur 3a die Signalleitung unterbrochen und in Figur 3b die Signalleitung 12 geschlossen ist.

Figur 3c und d zeigen eine Shunt-Schalter-Konfiguration, bei der die Schaltung durch einen elektrischen Nebenschluss erfolgt. Dabei ist in Figur 3c die Signalleitung 12 geschlossen, da der Schalter offen ist und somit kein Nebenschluss vor-

liegt. In Figur 3d ist die Signalleitung 12 unterbrochen, da der Schalter geschlossen ist und ein Nebenschluss vorliegt.

Die Figuren 3e und f zeigen eine Kombination von Serien- und Shunt-Konfiguration, wobei in Figur 3e der Schalter in der Signalleitung 12 geöffnet ist und in Figur 3f der Nebenschluss geschlossen ist.

Das Substrat 11, 21 ist aus einem Halbleitermaterial gefertigt, während die Signalleitung 12, 22 und das Schaltelement 13, 23 aus hochleitendem Material gefertigt werden, wie beispielsweise Al, Cu, Au, usw.

Bei der Herstellung des MEMS-Schalters werden zunächst elektrisch leitende Schichten als Signalleitung und Elektrodenanordnung auf dem Substrat ausgebildet und anschließend wird das Schaltelement 13, 23 freitragend auf der Substratoberfläche befestigt. Zur Erzeugung der Biegung und der Rückstellkraft im Biegebereich des Schaltelements wird seine Oberfläche mittels Laserheating angeschmolzen, um die notwendige Zugspannung im elastischen Biegebereich zu schaffen. Es kann aber auch bimorphes Material verwendet werden, um die Krümmung und die Rückstellkraft in den gebogenen Zustand hervorzurufen. Anstelle einer Bodenelektrode kann zur Erzeugung einer elektrostatischen Anziehungskraft auch ein hochhohmiges Substrat verwendet werden, wobei dieses auf seiner Rückseite mit einer Metallisierung 17 versehen ist, die als Masse dient, wobei diese Möglichkeit zur Veranschaulichung ebenfalls in Fig. 1 schematisch dargestellt ist.

Bei der Herstellung kann die in bekannten Verfahren verwendete sogenannte Opferschicht durch eine geeignete Oberflächenmodifikation, z.B. durch Hydrophobisierung, ersetzt werden. Dadurch wird der Abstand zwischen dem Schaltelement und der Bodenelektrode oder der Substratoberfläche noch geringer, so dass erheblich größere elektrische Felder und entsprechend kleinere Betriebsspannungen erzielt werden.

Durch die gebogene Form des Schaltelements in seiner Längsrichtung parallel zur Richtung der Signalleitung wird ein besonders großer Schaltweg möglich, so dass der Abstand im offenen Zustand bei geringer Größe des Schaltelements dennoch  
5 groß gestaltet werden kann und dadurch die Kapazität im offenen Zustand gering ist. Durch die erfindungsgemäße Anordnung wird eine höhere mechanische Stabilität erreicht. Darüberhinaus können die Schaltelemente mit einer größeren Rückstellkraft versehen werden, da aufgrund der geometrischen Anordnung der Elektroden und der Schaltelemente eine größere elektrostatische Anziehungskraft erzielt werden kann, wobei dennoch im geöffneten Zustand eine geringe Störkapazität  
10 vorliegt. Insbesondere in weitgehend autonomen Systemen und vor allem bei Satellitenanwendungen wird durch die erfindungsgemäße Ausgestaltung des Hochfrequenz-MEMS-Schalters eine verbesserte Langzeitstabilität und eine größere Zuverlässigkeit erzielt. Dabei wird auch die Gefahr der Adhäsion oder allgemein eines Hängenbleibens oder Verhakens des Schaltelements an der Substrat-  
15 oberfläche oder der Oberfläche der Signalleitung reduziert bzw. eliminiert.

**Patentansprüche**

1. MEMS-Schalter mit gebogenem Schaltelement, umfassend:  
einen Signalleiter (12), der auf einem Substrat (11) angeordnet ist,  
5 ein länglich geformtes Schaltelement (13), das einen gebogenen elastischen Biegebereich (131, 132) aufweist und freitragend auf dem Substrat (11) befestigt ist, und  
eine Elektrodenanordnung (14a, 14b) zur Erzeugung einer auf das Schaltelement (13) wirkenden elektrostatischen Kraft, um das Schaltelement (13)  
10 zum Signalleiter (12) hin zu biegen,  
dadurch gekennzeichnet, dass  
das Schaltelement (13) mindestens zwei Schaltarme (13a, 13b) mit gebogenem elastischen Biegebereich (131, 132) umfasst, die beidseitig des  
Signalleiters (12) parallel zu diesem angeordnet sind und an einem freien  
15 Ende durch eine über dem Signalleiter (12) positionierte Brücke (15) miteinander verbunden sind,  
wobei die Schaltarme (13a, 13b) derart ausgestaltet sind, dass sich der jeweilige elastische Biegebereich (131, 132) bei Einwirkung der elektrostatischen Kraft fortschreitend in einer Richtung parallel zum Signalleiter (12) an  
20 die Elektrodenanordnung (14a, 14b) annähert.
2. Hochfrequenz-MEMS-Schalter nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Brücke (15) einen Kontaktbereich bildet.
- 25 3. Hochfrequenz-MEMS-Schalter nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektrodenanordnung (14a, 14b) durch mindestens eine Bodenelektrode gebildet wird, die unter dem Schaltelement flächig auf dem Substrat (11) angeordnet ist, um das Schaltelement (13) elektrostatisch anzuziehen.

4. Hochfrequenz-MEMS-Schalter nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektrodenanordnung durch eine unterhalb des Substrats (11) angeordnete Masseelektrode oder durch das Substrat selbst gebildet wird.
- 5
5. Hochfrequenz-MEMS-Schalter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass sich die Elektrodenanordnung (14a, 14b) parallel zur Substratoberfläche erstreckt, um das Schaltelement (13) durch die elektrostatische Kraft in seinem Biegebereich (131, 132) fortschreitend zur Substratoberfläche hin zu ziehen.
- 10
6. Hochfrequenz-MEMS-Schalter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der gebogene Biegebereich (131, 132) durch bismorphes Material gebildet ist.
- 15
7. Hochfrequenz-MEMS-Schalter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Biegebereich (131, 132) zur Erzeugung einer Zugspannung eine durch Laserheating angeschmolzene Oberfläche aufweist.
- 20
8. Hochfrequenz-MEMS-Schalter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Schaltelement (13) in Dünnschichttechnologie gefertigt ist.
- 25
9. Hochfrequenz-MEMS-Schalter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass bei Einwirken der elektrostatischen Kraft der Kontaktbereich (15) in direkten Kontakt mit dem Signalleiter (12) gerät.

10. Hochfrequenz-MEMS-Schalter nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass bei Einwirken der elektrostatischen Kraft der Kontaktbereich (15) einen minimalen Abstand zum Signalleiter (12) einnimmt.

5 11. Verfahren zur Herstellung eines Hochfrequenz-MEMS-Schalters mit gebogenem Schaltelement, mit den Schritten:

Ausbilden eines Signalleiters (12) auf einem Substrat (11);

Ausbilden einer Elektrodenanordnung (14a, 14b) an dem Substrat (11);

10 Formung eines länglichen Schaltelements (13) mit einem gebogenen elastischen Biegebereich (131, 132) auf dem Substrat (11) derart, dass es in dem Biegebereich (131, 132) von der Elektrodenanordnung (14a, 14b) durch eine elektrostatische Kraft der Länge nach zum Substrat (11) hin gezogen wird und sich durch eine elastische Rückstellkraft im Biegebereich (131, 132) vom Substrat (11) entfernt;

15 **dadurch gekennzeichnet, dass**

das Schaltelement (13) mindestens zwei Schaltarme (13a, 13b) mit gebogenem elastischen Biegebereich (131, 132) umfasst, die beidseitig des Signalleiters (12) parallel zu diesem angeordnet werden und an einem freien Ende durch eine über dem Signalleiter (12) positionierte Brücke (15)

20 miteinander verbunden sind,  
wobei die Schaltarme (13a, 13b) derart ausgestaltet werden, dass sich der jeweilige elastische Biegebereich (131, 132) bei Einwirkung der elektrostatischen Kraft fortschreitend in einer Richtung parallel zum Signalleiter (12) an die Elektrodenanordnung (14a, 14b) annähert.

25

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Brücke (15) als Kontaktbereich ausgebildet wird.

30 13. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass als Elektrodenanordnung mindestens eine unterhalb des Substrats (11) angeordnete Masseelektrode gebildet wird.



14. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Oberfläche des Biegebereichs (131, 132) zur Erzeugung einer Zugspannung mittels Laserheating angeschmolzen wird.

5

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass es zur Herstellung eines Hochfrequenz-MEMS-Schalter nach einem der Ansprüche 1 bis 10 dient.

10

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektrodenanordnung (14a, 14b) durch ein oder mehrere eigenleitende Substratbereiche oder durch ein eigenleitendes Substrat ausgebildet wird.

15

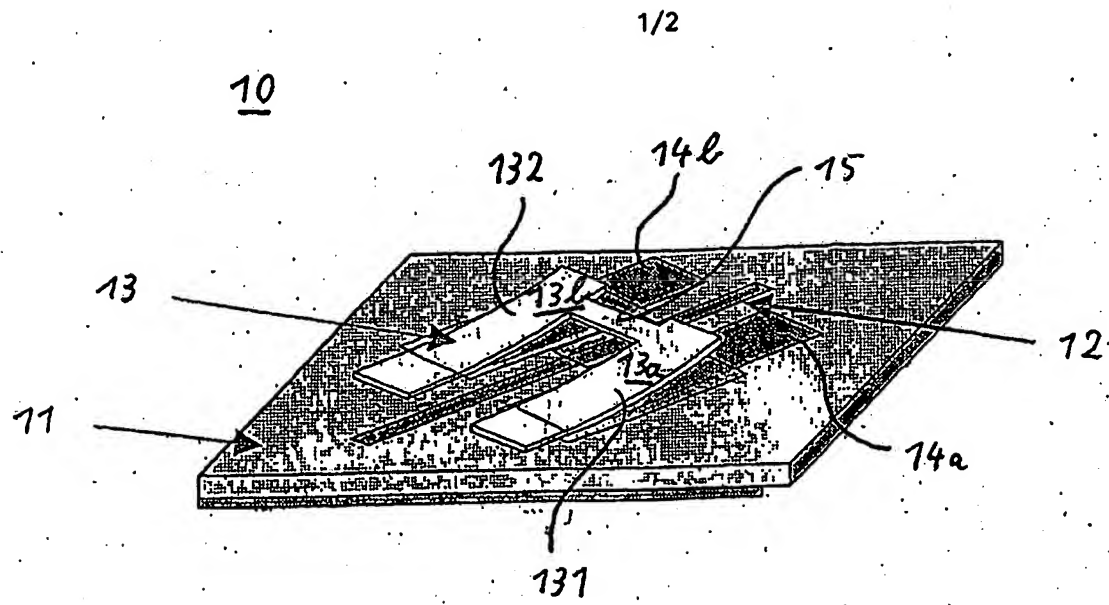


Fig. 1

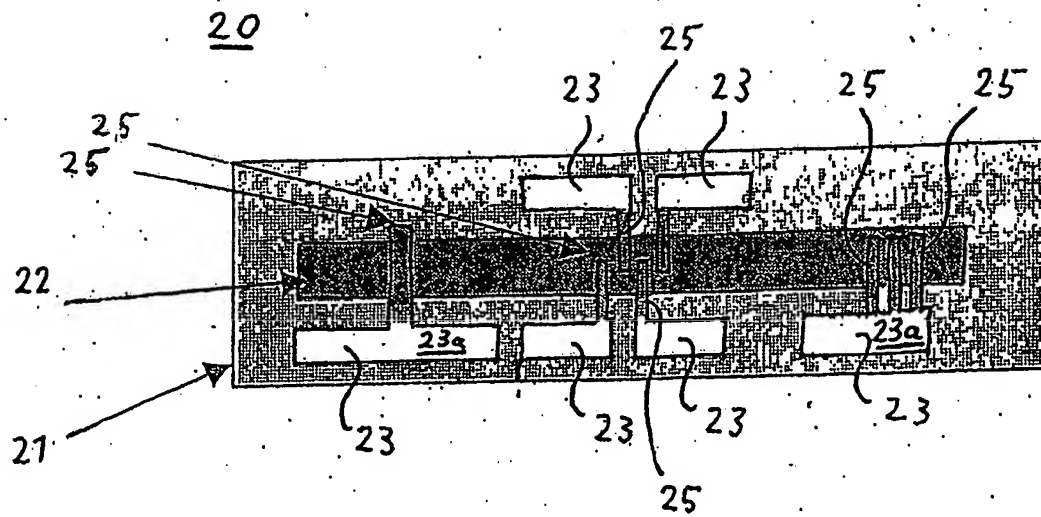


Fig. 2

2/2

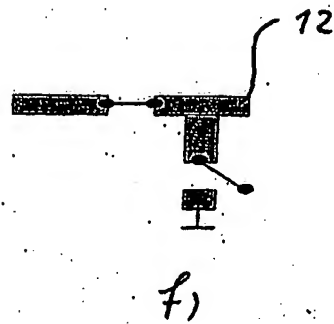
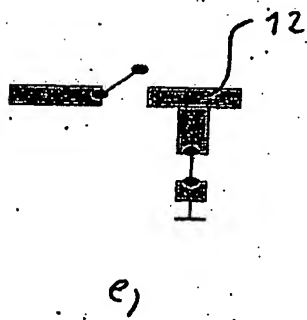
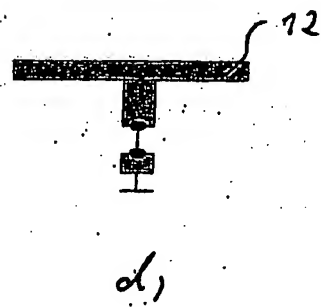
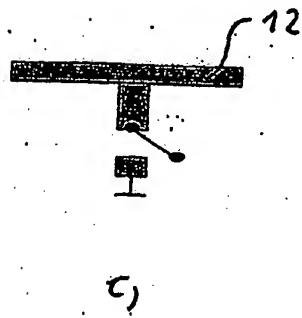
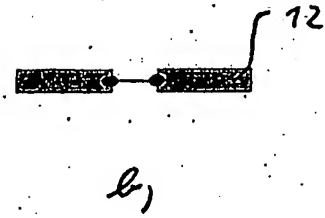
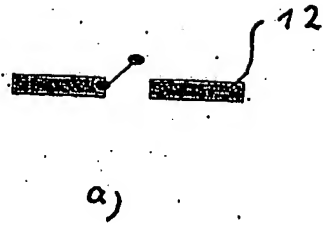


Fig. 3